

Dynamische Sanierung von Bauwerken mit menschenerregten Schwingungen

Bachmann, Hugo

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1991 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.167-188



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Dynamische Sanierung von Bauwerken mit menschenerregten Schwingungen

Schriftliche Fassung des Vortrages vom 14. Juni 1991
an der Technischen Universität Braunschweig

Von **Hugo Bachmann**

Einleitung

Was sind „menschenerregte Schwingungen“? Darunter verstehen wir Schwingungen von Bauwerken, die durch rhythmische menschliche Körperbewegungen verursacht werden, also z.B. durch Gehen, Laufen, Hüpfen, Tanzen, Klatschen, Fußstampfen usw. Solche Schwingungen können beträchtlich sein, und sie können eine dynamische Sanierung, d.h. eine Schwingungssanierung, des betroffenen Bauwerks erforderlich machen.

Schon im letzten Jahrhundert war das Schwingen von Brücken bekannt, vor allem von Hängebrücken, wenn z.B. ein Trupp Soldaten im Gleichschritt darüber marschierte. Tatsächlich wurden mehrere schwere Brückeneinstürze durch Fußgänger verursacht.

Wie steht es damit heute? Heute können nicht nur Schwingungsprobleme durch das Gehen von Fußgängern auftreten, sondern es gibt eben auch Einwirkungen aus zahlreichen anderen rhythmischen menschlichen Körperbewegungen, die, wenn sie in Gruppen und synchronisiert durchgeführt werden, außer Brücken auch manche andere Bauwerke in starke Schwingungen versetzen können (Tabelle 1). Und heutige moderne Bauwerke können sehr schwingungsanfällig sein, vor allem solche, die schlank und elegant ausgebildet sind, und die oft auch eine geringe strukturelle Dämpfung aufweisen. Dazu zwei Beispiele:

Rhythmische Körperbewegungen	Betroffene Bauwerke
<ul style="list-style-type: none"> – Gehen – Laufen – Hüpfen – Tanzen – Klatschen mit Wippen stehend – Klatschen allein – Schunkeln sitzend oder stehend 	<ul style="list-style-type: none"> – Fußgängerbauwerke – Bürogebäude – Turn- und Sporthallen – Tanz- und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung – Konzertsäle und Theater mit fester Bestuhlung sowie Tribünen (mit Popkonzerten etc.) – Sprungtürme in Schwimmbädern

Tabelle 1: Rhythmische Körperbewegungen und betroffene Bauwerke.

- Die Decke unter einem *Konzertsaal* mit fester Bestuhlung für rund 2000 Sitzplätze hat Spannweiten von 40×40 m und eine Grundfrequenz von 2.4 Hz. Die Decke wurde durch rhythmisches Klatschen des Publikums in starke Schwingungen versetzt.
- Ein in der Zwischendecke einer doppelstöckigen *Turnhalle* vorhandener 14 m langer Träger aus teilweise vorgespanntem Leichtbeton wurde im Labor des Instituts für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich nachgebildet und geprüft. Der Träger weist eine Masse von rund 8 Tonnen und bei einer Spannweite von 13,2 m eine Grundfrequenz von ~ 4 Hz auf. Durch Hüpfen einer einzigen Person konnten Beschleunigungen in der Trägermitte von bis zu 1,5 g erzeugt werden. Dies bewirkte, daß sich der Träger von den Auflagen abhob und mit lautem Knall wieder zurückfiel, also einen eigentlichen Luftsprung vollführte.

Grundlagen

Zur Bewältigung von Problemen mit menschenerregten Schwingungen sind die folgenden wichtigen Grundlagen erforderlich:

1. Verständnis der Phänomene

Beim Verständnis der auftretenden Schwingungsphänomene wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. Insbesondere hat man erkannt und bei praktischen Fällen nachgewiesen, daß die Übereinstimmung einer Bauwerksfrequenz mit der Frequenz einer oberen Harmonischen der Fourier-Zerlegung des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Einwirkung zu Resonanzphänomenen führen kann [1].

2. Kenntnis und mathematische Modellierung der dynamischen Einwirkungen aus menschlichen Körperbewegungen

Auch bezüglich der Einwirkungen konnte in der letzten Zeit der Wissensstand wesentlich verbessert werden. Durch Versuche wurden die dynamischen Kräfte aus rhythmischen menschlichen Körperbewegungen erforscht und deren mathematische Modellierung vorangetrieben. Insbesondere wurden für bestimmte Einwirkungen die maßgebenden Frequenzbereiche und die Fourier-Amplitudenkoeffizienten ermittelt [2], [3].

3. Kenntnis der dynamischen Eigenschaften moderner Bauwerke

Bei den dynamischen Eigenschaften der Bauwerke bestehen oft noch die größten Wissenslücken und Unsicherheiten. Vor allem die dynamischen Steifigkeiten inklusive Einfluß der Rißbildung bei Stahlbeton- und Spannbetontragwerken und die Dämpfungseigenschaften sind oft kaum bekannt, oder es gibt große Streuungen. Es müssen deshalb Grenzwertbetrachtungen durchgeführt werden.

Modellierung der dynamischen Einwirkungen

Für den als periodisch angenommenen Zeitverlauf der dynamischen Einwirkungen aus rhythmischen menschlichen Körperbewegungen kann der folgende Ansatz gemacht werden:

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \sin(2\pi f_p t) + \Delta G_2 \sin(4\pi f_p t - \varphi_2) + \Delta G_3 \sin(6\pi f_p t - \varphi_3) + \dots$$

mit

f_p = Grundfrequenz der Einwirkung (Bewegungsfrequenz, d.h. Geh-, Lauf-, Hüpf-, Tanz- usw. -frequenz)

G = Eigenlast der sich bewegenden Person

ΔG_i = Kraftanteil der i -ten Harmonischen mit $i = 2, 3, \dots$ (Fourier-Amplitude)

φ_i = Phasenverschiebung der i -ten Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen, mit $i = 2, 3, \dots$

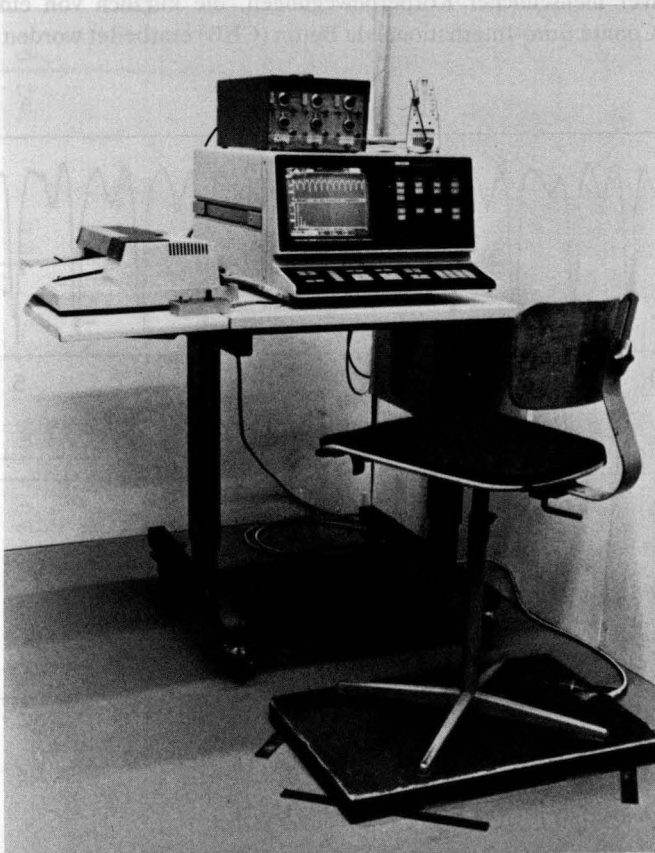


Bild 1:

Versuchseinrichtung zur Messung von Kräften aus menschlichen Körperbewegungen (aus [4]).

Insbesondere die Größen ΔG_i und φ_i müssen durch Versuche ermittelt werden. Bild 1 zeigt eine Einrichtung zur Messung von vertikalen Kräften aus menschlichen Körperbewegungen, z.B. aus Klatschen beim Sitzen. Am Boden befindet sich die Kraftmeßplatte, oben rechts ist das Metronom, das den Takt bzw. die Grundfrequenz der Einwirkung angibt, und auf dem Tisch stehen die Registrier- und Auswertegeräte. Sowohl der Zeitverlauf der dynamischen Kraft als auch das Fourier-Amplitudenspektrum erscheinen simultan auf dem Bildschirm und können sofort ausgedruckt werden. Bild 2 zeigt als Beispiel den Zeitverlauf der Vertikalkraft infolge Fußstampfens mit 2 Hz und das zugehörige Fourier-Amplitudenspektrum. Man erkennt, daß außer in der 1. auch in der Frequenz der 2., 3. und sogar 4. Harmonischen, d.h. in der zwei-, drei- und vierfachen Fußstampffrequenz und somit bis zu 8 Hz hinauf, noch verhältnismäßig große Kräfte abgegeben werden.

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung von Kenngrößen der dynamischen Kräfte repräsentativer menschlicher Körperbewegungen, die kürzlich von einer Arbeitsgruppe des Comité Euro-International du Béton (CEB) erarbeitet worden ist.

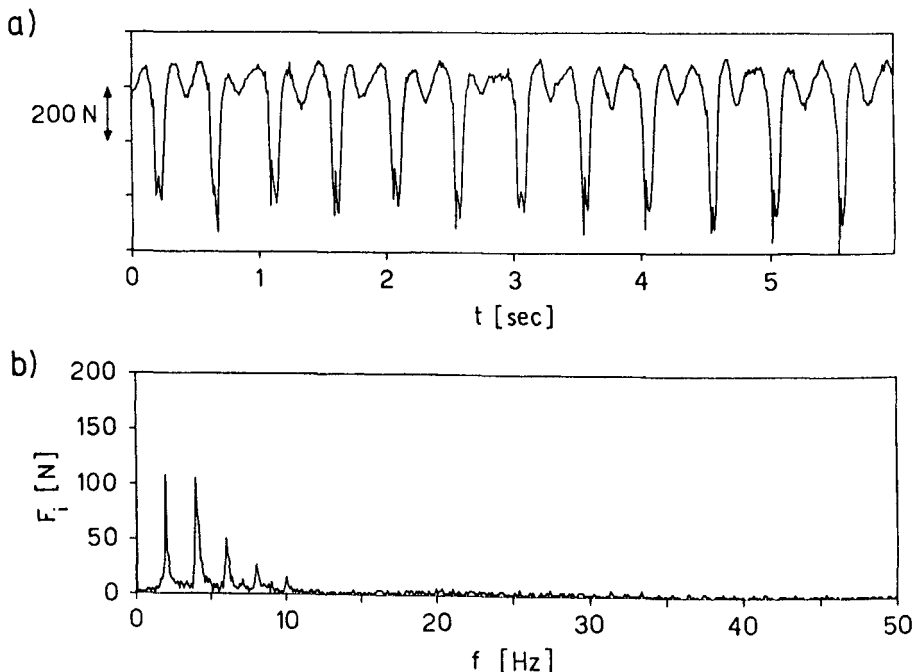


Bild 2:
Zeitverlauf (a) und Fourier-Amplitudenspektrum (b) der Vertikalkraft infolge Fußstampfens mit 2 Hz (aus [4]).

Repräsentative			Fourier-Koeffizient $\alpha_i = \Delta G_i/G$ und Phasenverschiebung φ_i					Bemessungsdichte
Körperbewegungen Bemessungsfrequenz [Hz]			α_1	α_2	φ_2	α_3	φ_3	[Personen/m ²]
Gehen	vertikal	2.0	0.4	0.1	$\pi/2$	0.1	$\pi/2$	~1
		2.4	0.5					
	vorwärts	2.0	0.5 ($\alpha_{1/2} = 0.1$)	0.2				
	seitwärts	2.0	$\alpha_{1/2} = 0.1$	$\alpha_{3/2} = 0.1$				
Laufen		2.0 bis 3.0	1.6	0.7		0.2		
Hüpfen	normal	2.0	1.8	1.3	A	0.7	A	in Konditionstrainings ~0.25 (in extremen Fällen bis zu 0.5) A: $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi (1-f_h t_p)$
		3.0	1.7	1.1	A	0.5	A	
	hoch	2.0	1.9	1.6	A	1.1	A	
		3.0	1.8	1.3	A	0.8	A	
Tanzen		2.0 bis 3.0	0.5	0.15		0.1		~ 4 (in extremen Fällen bis zu 6)
Klatschen mit Wippen stehend		1.6	0.17	0.10		0.04		ohne feste Sitze ~4 (in extremen Fällen bis zu ~6) mit festen Sitzen ~2 bis 3
		2.4	0.38	0.12		0.02		
Klatschen	normal	1.6	0.024	0.010		0.009		~ 2 bis 3
		2.4	0.047	0.024		0.015		
	intensiv	2.0	0.170	0.047		0.037		
Schunkeln	sitzend	0.6	$\alpha_{1/2} = 0.4$	–		–		~ 3 bis 4
	stehend	0.6	$\alpha_{1/2} = 0.5$	–		–		

Tabelle 2: Zusammenstellung von Kenngrößen repräsentativer Körperbewegungen.

Mögliche Maßnahmen

Es können drei verschiedene mögliche Maßnahmen gegen übermäßige menschen-induzierte Bauwerksschwingungen unterschieden werden:

1. Frequenzabstimmung

Die Eigenfrequenzen, insbesondere die Grundfrequenz, des Bauwerks werden gemessen (bei bestehenden Bauwerken) bzw. berechnet (bei projektierten Bauwerken), und das Bauwerk wird so angepaßt, d.h. so abgestimmt (meist Hochabstimmung), daß bestimmte Frequenzkriterien und damit bestimmte Grenzwerte für die Eigenfrequenzen eingehalten werden.

Es können die folgenden *Frequenzkriterien* formuliert werden:

- Fußgängerbauwerke:
Vermeiden der Frequenzen der 1. und 2. Harmonischen beim „Gehen“
- Turn- und Sporthallen:
Hochabstimmung über die Frequenz der 2. Harmonischen beim „Hüpfen“
- Bürogebäude:
Hochabstimmung über die Frequenz der 2. Harmonischen (Dämpfungsmaß $\zeta > 5\%$) bzw. der 3. Harmonischen ($\zeta < 5\%$) aus „Gehen“
- Tanz- und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung:
Hochabstimmung über die Frequenz der 2. Harmonischen beim „Tanzen“
- Konzertsäle und Theater mit fester Bestuhlung sowie Tribünen (mit Popkonzerten):
Vertikal: Hochabstimmung über die Frequenz der 2. Harmonischen beim „Klatschen mit Wippen stehend“
Horizontal: Hochabstimmung über die Frequenz der 3. Harmonischen beim „Schunkeln“
- Sprungtürme in Schwimmbädern:
Spezielle Kriterien

Diese Frequenzkriterien führen auf *Grenzwerte für die Eigenfrequenzen*, die in Tabelle 3 wiedergegeben sind. Bei einigen Bauwerksarten muß zwischen den Bauweisen Stahlbeton, Spannbeton, Verbund Stahl-Beton und Stahl unterschieden werden, da in dieser Reihenfolge sowohl die Masse als auch die Dämpfung abnehmen und somit bei gleicher Eigenfrequenz die Schwingungsamplituden größer würden.

Die Frequenzabstimmung ist eine verhältnismäßig einfache, wenn auch eher grobe und pauschale Methode, die sich aber in der Praxis bewährt hat.

Bauwerksart	Bauweise			
	Stahlbeton	Spannbeton	Verbund Stahl-Beton	Stahl
Fußgängerbauwerke	1.6 bis 2.4 Hz und 3.5 bis 4.5 Hz vermeiden			
Bürogebäude	> 4.8 Hz ($\zeta > 5\%$) bzw. > 7.2 Hz ($\zeta < 5\%$)			
Turn- und Sporthallen	> 7.5 Hz	> 8.0 Hz	> 8.5 Hz	> 9.0 Hz
Tanzlokale und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung	> 6.5 Hz	> 7.0 Hz	> 7.5 Hz	> 8.0 Hz
Konzertsäle und Theater mit fester Bestuhlung sowie Tribünen (mit Popkonzerten)	vertikal: > 6.5 Hz horizontal: > 6.5 Hz			

Tabelle 3: Grenzwerte für die Eigenfrequenzen von Bauwerken mit menschenerregten Schwingungen.

2. Amplitudenbegrenzung

Die Schwingungsamplituden des Bauwerks, meist ist es die Beschleunigung, werden gemessen (bei bestehenden Bauwerken) bzw. berechnet (bei projektierten Bauwerken), und das Bauwerk wird so angepaßt, daß bestimmte zulässige Werte der Schwingungsamplituden nicht überschritten werden.

Die an sich „genauere“ Methode der Amplitudenbegrenzung erfordert die Berechnung einer erzwungenen Schwingung und somit im Vergleich zur Frequenzabstimmung zusätzlich die Kenntnis bzw. Annahme der dynamischen Einwirkungen und der Dämpfungseigenschaften des Bauwerks, was vor allem bei projektierten Bauwerken zu erheblichen Unsicherheiten und Risiken führen kann.

3. Einsatz von Schwingungstilgern

Am Bauwerk werden Schwingungstilger, d.h. zusätzliche, dynamisch bemessene Masse-Feder-Dämpfer-Systeme, zur Reduktion der Schwingungsamplituden des Bauwerks auf zulässige Werte angebracht.

Der Einsatz von Schwingungstilgern eignet sich zur Schwingungssanierung vor allem von Stabtragwerken mit eher niedriger Dämpfung. In bestimmten Fällen können Schwingungstilger bereits bei der Projektierung von Bauwerken vorgesehen werden.

Im folgenden werden praktische Fälle von Bauwerken beschrieben, die nur für statische Lasten bemessen wurden, und bei denen deshalb nachträglich eine dynamische Sanierung, d.h. eine Schwingungssanierung, durchgeführt werden mußte.

Turnhalle mit Stahlbeton-Unterzugsdecke

Bei einer doppelstöckigen Turnhalle traten bald nach der Inbetriebnahme starke Schwingungen auf [1]. Sie wurden beobachtet, wenn in der oberen Halle Konditionstrainings, d.h. Hüpf-, Sprung- und Laufübungen zu rhythmischer Musik, durchgeführt wurden. Die Schwingungen äußerten sich vor allem in der unteren Halle durch sichtbare vertikale Durchbiegungen der durch die Turnenden direkt belasteten Zwischendecke, durch horizontale Fassadenbewegungen und durch einen erheblichen Lärm, hervorgerufen durch das Mitschwingen und Klappern der Eingangstüren und des Tores zum Geräteraum sowie von an Decke, Fassaden und Wänden befestigten Ausstattungsteilen und Turngeräten. Ferner konnte bei geöffneter Eingangstüre ein starker rhythmischer Luftzug infolge Kompression und Dekompression des Hallenvolumens verspürt werden. Diese Wirkungen führten dazu, daß wiederholt Personen die untere Halle fluchtartig verließen, wenn in der oberen Halle Konditionstrainings durchgeführt wurden.

Im Bild 3a ist der Querschnitt der Halle dargestellt. Die Zwischendecke besteht aus 1 m hohen und rund 18,5 m weit gespannten Stahlbetonträgern im Abstand von 3 m. Sie sind auf Randlängsträgern und diese auf Stahlstützen im Abstand von 6 m aufgelagert.

Um die dynamischen Eigenschaften der Decke und deren Beanspruchungen zu ermitteln, wurden Versuche und Messungen durchgeführt. Dabei wurden die dynami-

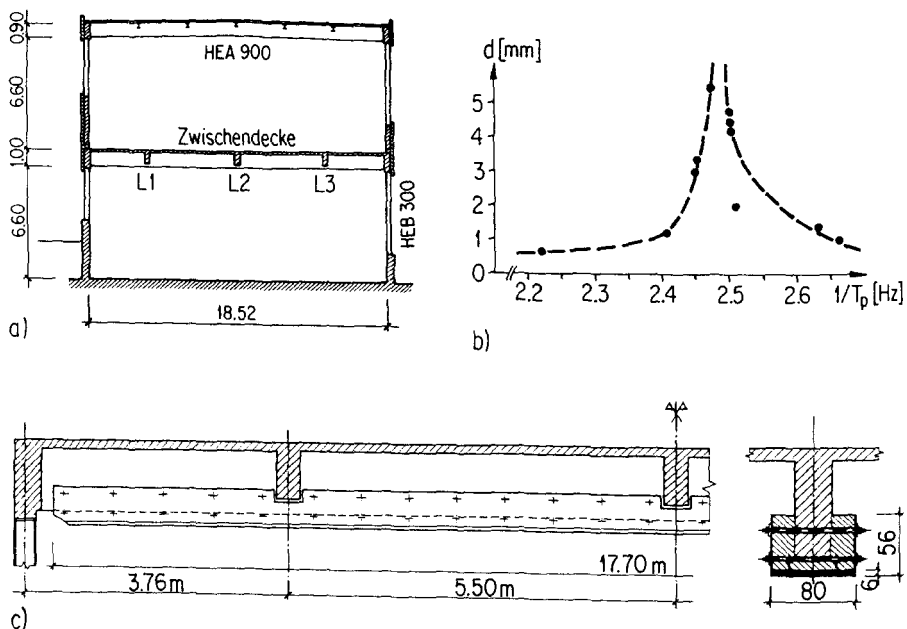


Bild 3:

Turnhalle mit Stahlbetondecke: a) Querschnitt mit Zwischendecke; b) Resonanzkurve der Verschiebung; c) Ansicht und Querschnitt der ausgeführten Sanierung.

schen Kräfte durch die Turnenden mit verschiedenen Übungsarten und Frequenzen selbst aufgebracht. Insbesondere wurden Resonanzkurven aufgenommen, indem die bis zu 130 Teilnehmer – über Lautsprecher durch ein Metronom mit bekannter Frequenz synchronisiert – mit Frequenzen zwischen 2.0 und 3.2 Hz während jeweils etwa 20 Sekunden die Übung „Hüpfen an Ort“ ausführten (Bild 3b). Die stärksten Schwingungen traten bei einer Hüpf Frequenz von ~ 2.45 Hz auf. Die Grundfrequenz des Bauwerks betrug ~ 4.9 Hz. Die Resonanzanregung erfolgte somit durch die 2. Harmonische des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Kraft, oder anschaulicher ausgedrückt: Die Turnenden übten einen „Stoß in jedes zweite Wellental der Bauwerksschwingung“ (mit Phasenverschiebung) aus. Die größte gemessene vertikale Verschiebung betrug $\pm 5,5$ mm, die entsprechende Geschwindigkeit 167 mm/s, die maximale Beschleunigung $5,15 \text{ m/s}^2$, d.h. 52% g (Erdbeschleunigung).

Die Dämpfung wurde aus Ausschwingversuchen zu 2,4% der kritischen Dämpfung bestimmt, indem im eingeschwungenen Zustand des Bauwerks die Turnenden auf Kommando die Übung abbrechen mußten (das Dämpfungsmaß der Decke ohne Personen ist geringer).

Da bei den vorliegenden Beanspruchungen die Gefahr von Ermüdungsbrüchen der Bewehrungsstähle und anderer Schäden bestand und zudem die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt war – in der oberen Halle konnten keine Konditionstrainings mit üblicher Anzahl Teilnehmer mehr zugelassen werden –, mußte eine Sanierung vorgenommen werden. Dabei wurde, um Resonanzzustände infolge der 2. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Kraft auszuschließen, eine Anhebung der Grundfrequenz auf etwa 7.5 Hz angestrebt (vgl. Tabelle 3). Zur Versteifung der Träger wurde ein Unterflansch angebaut, bestehend aus einer Stahllamelle mit Querschnitt 800×60 mm und zwei Seitenblechen. Der Verbund wurde durch Beton hergestellt, der nach sorgfältigem Aufrauh der bestehenden Träger in den Zwischenraum eingebracht und nach dem Erhärten durch vorgespannte Schrauben in Querrichtung angepreßt wurde (Bild 3c). Analoge Versuche zu den vor der Sanierung durchgeführten ergaben noch maximale vertikale Verschiebungen von $\pm 0,3$ mm, d.h. noch 5% derjenigen vor der Sanierung. Resonanzähnliche Schwingungen konnten nicht mehr beobachtet werden. Die Grundfrequenz wurde zu 7.3 Hz, die Dämpfung zu 2% ermittelt.

Turnhalle mit Stahlbeton-Rippendecke

In einer anderen doppelstöckigen Turnhalle wurden ebenfalls erhebliche Deckenschwingungen festgestellt, die beim normalen Turnbetrieb und insbesondere bei rhythmischen Turnübungen auftraten. Die Schwingungen wirkten störend, und sie weckten auch die Befürchtung, daß die Decke ungenügend tragsicher sein könnte.

Es handelt sich um eine schlaff bewehrte Stahlbeton-Rippendecke mit 15×27 m Grundrißabmessungen. In Hauptrichtung mit einer Spannweite von 14,6 m sind 0,15 m breite und 0,46 m hohe Ort betonrippen im Abstand von 0,65 m angeordnet. Auf der einen Längsseite (Fensterfront) sind die Rippen über einen Randunterzug frei drehbar auf Fassadenstützen gelagert, auf der anderen Längsseite in Betonwänden und Betondecken praktisch starr eingespannt.

Zur Ermittlung der dynamischen Eigenschaften der Decke wurden Stoßversuche sowie Hüpf- und Laufversuche mit Hilfe zweier Schulklassen durchgeführt. Die insgesamt 34 etwa 14jährigen Schüler führten zum Takt eines Metronoms die Standardübung „Hüpfen an Ort“ mit Hüppfrequenzen zwischen 1.4 und 3.5 Hz durch. Die stärksten Schwingungen ergaben sich bei einer Hüppfrequenz von 2.58 Hz; die Grundfrequenz der Decke wurde zu 5.15 Hz ermittelt. Die Resonanzanregung erfolgte also auch hier durch die 2. Harmonische des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Kraft. Die Resonanzkurve der Beschleunigung deutete aber auch eine Resonanzstelle mit der 3. Harmonischen bei ~ 1.7 Hz an. Die größten Schwingwerte betrugen $\pm 1,6$ mm Verschiebung, ± 50 mm/s Geschwindigkeit und $\pm 1,65$ m/s² Beschleunigung. Das Dämpfungsmaß wurde zu $\zeta \cong 3\%$ bestimmt, was für Turnhallendecken recht hoch ist.

Bei Schwingungen von Turnhallendecken können aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit Beschleunigungen in der Größenordnung von 0,05 g, allerhöchstens aber 0,1 g, toleriert werden. Da in der fraglichen Turnhalle auch Übungen mit zahlreichen erwachsenen Teilnehmern durchgeführt werden, entschloß sich die Eigentümerin zu einer Sanierung. Die Grundfrequenz der Decke sollte auf rund 7.5 Hz angehoben werden (vgl. Tabelle 3). Es wurden sechs Sanierungsvarianten untersucht. Am vorteilhaftesten erwiesen sich eine Variante mit Abbruch der bestehenden Decke und Ersatz durch eine neue Decke aus Spannbeton sowie eine Variante, bei der ein Trägerrost aus Stahl unter die bestehende Decke eingezogen wird, die beide etwa gleiche Gesamtkosten verursacht hätten. Obwohl die zweite Variante zu einer erheblichen Beschneidung des Lichtraumes der unteren Halle führte, wurde ihr vor allem aus Gründen der kürzeren Bauzeit und einfacheren Ausführung der Vorzug gegeben. Bild 4 zeigt einen Querschnitt durch die sanierte Turnhallendecke.

Nach der Sanierung wurden zur Kontrolle wiederum Versuche mit der Standardübung „Hüpfen an Ort“ durchgeführt, und zwar mit 51 etwa 15jährigen Schülern, die im maßgebenden Mittelbereich der Decke entsprechend der hohen Flächenbelegung von 1 Person je 2 m² [1] aufgestellt waren. Die Grundfrequenz der sanierten Decke ergab sich zu 7.47 Hz, die Dämpfung im Ausschwingversuch zu $\zeta \cong 3,2\%$. Die Grund-

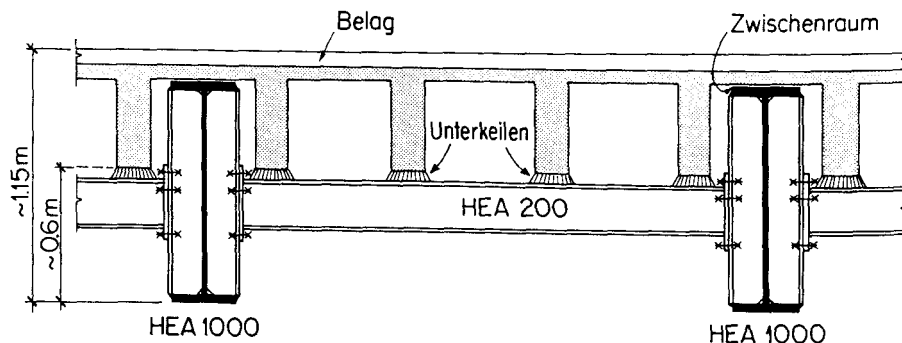


Bild 4:
Querschnitt durch die sanierte Turnhallendecke.

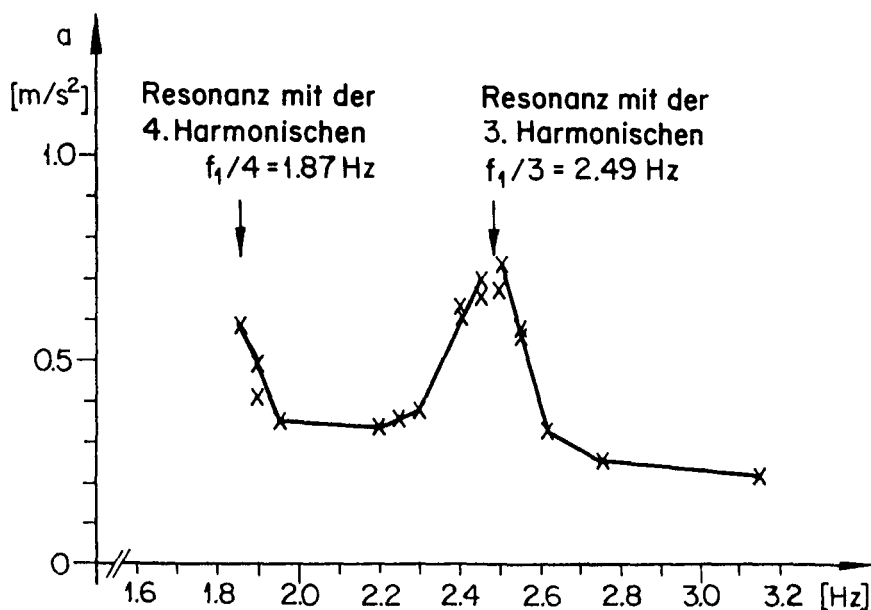


Bild 5:

Resonanzkurve der Beschleunigung nach der Sanierung der Turnhallendecke.

schwingung konnte sowohl mit der 3. als auch mit der 4. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Kraft am stärksten angeregt werden, d.h. mit Hüppfrequenzen von 2.49 Hz und 1.87 Hz (Bild 5). Dabei wurden größte Beschleunigungen von 0,74 m/s^2 bei 2.49 Hz und von 0,60 m/s^2 bei 1.87 Hz gemessen. Sie liegen damit im tolerierbaren Bereich von 5% bis 10% der Erdbeschleunigung [1]. Die nach den Angaben in [1] ermittelten rechnerischen Werte für die Verschiebungen und Beschleunigungen lagen rund 10% höher als die gemessenen Werte, was einer guten Übereinstimmung entspricht.

Turnhalle mit Verbundträgerdecke

Nicht immer ist die dynamische Sanierung so aufwendig wie bei den bereits beschriebenen beiden Bauwerken. Im Fall einer doppelstöckigen Turnhalle mit einer Zwischendecke in Stahl-Beton-Verbundweise (Bild 6) konnte die Sanierung auf verhältnismäßig einfache Weise vorgenommen werden.

Seit der Inbetriebnahme dieser Turnhalle traten während des Turnbetriebes starke Schwingungen auf. Die Zwischendecke konnte bereits durch wenige Personen, die in der oberen Halle rhythmische Turnübungen durchführten, in stark spürbare Schwingungen versetzt werden. Diese übertrugen sich auf Fassaden und angrenzende Gebäudeteile, was zu lautem Klappern von Fenstern und Türen führte. Bei einer Tanzveranstaltung, an der eine größere Anzahl Erwachsener teilnahm, brachten die sehr starken Schwingungen eine Fensterscheibe zu Bruch.

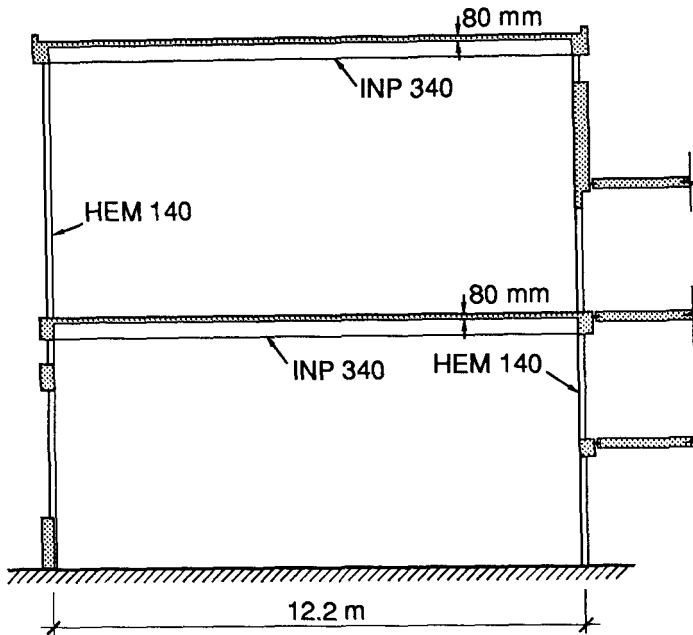


Bild 6:

Querschnitt durch die Turnhalle mit einer Zwischendecke in Stahl-Beton-Verbundbauweise.

Die Zwischendecke hat eine Spannweite in der Haupttragrichtung von 12,2 m und eine Länge von 24,4 m. Im Abstand von 2,44 m sind 340 mm hohe Stahlträger (INP 340) angeordnet; darauf liegt eine 80 mm starke Ortbetonplatte. Der später ersetzte Bodenbelag bestand aus 45 mm Zementmörtelestrich mit Bewehrungsnetz und Linoleumfliesen mit Unterlage (ca. 22 mm). Der Verbund zwischen Stahlträgern und Betonplatte wird durch Schubnocken gewährleistet. Die Stahlträger sind an der Längsseite der Halle an durchgehenden Stahlstützen angeschweißt. Bild 6 zeigt einen Querschnitt des Gebäudes. Die verhältnismäßig schlanke Konstruktion der Zwischendecke läßt erkennen, daß diese nur für statische Lasten bemessen worden war.

Bei ähnlichen Versuchen wie in den vorangehend beschriebenen Fällen konnten 40 achtjährige Schüler Beschleunigungen bis zu $2,5 \text{ m/s}^2$ erzeugen; tolerierbar sind im allgemeinen – wie bereits festgestellt – $0,5 \text{ m/s}^2$ bis höchstens 1 m/s^2 . Bild 7 zeigt die Resultate von Hüpfversuchen vor der Sanierung. Die Decke wies eine Grundfrequenz von 5 Hz auf. Resonanz ergab sich beim Hüpfen mit 2.5 Hz. Dabei stimmte die Frequenz der 2. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Kraft mit der Grundfrequenz des Bauwerks überein. Das Dämpfungsmaß war amplitudenabhängig und betrug 1,5 bis 3% (Ausschwingversuche, inklusive Energiedissipation durch stillstehende Schüler).

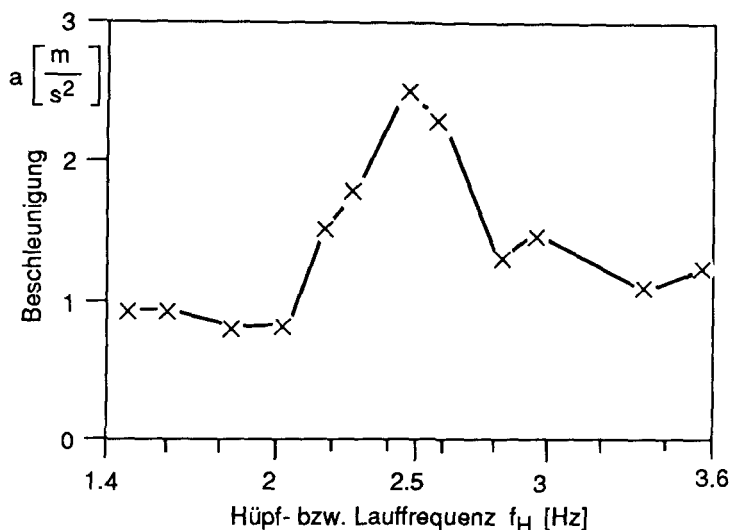


Bild 7:
Resultate der Hüpfversuche vor der Sanierung.

Ohne Schwingungssanierung konnte ein Ermüdungsbruch der Konstruktion nicht völlig ausgeschlossen werden. Wegen der massiven Überschreitung der tolerierbaren Werte der Beschleunigung (und ebenso der Schwinggeschwindigkeit) wurde eine Sanierung aber auch im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit als notwendig erachtet. Damit ließen sich Geräusche vermindern, weitere Schäden an nichttragenden Bauteilen vermeiden, und Nutzungsbeschränkungen wurden hinfällig.

Durch die Sanierung sollte die Grundfrequenz des Tragwerks von 5 Hz auf mindestens 8.5 Hz angehoben werden (vgl. Tabelle 3). Dazu wurden Stahlträger IPP 400 an die vorhandenen Stahlträger INP 340 angeschweißt (Bild 8a). Als sekundäre Maßnahme wurden, da sich die Ort betonplatte in Hallenlängsrichtung als sehr weich erwiesen hatte, in den mittleren beiden Fünftelpunkten der Spannweite der verstärkten Stahlträger über die ganze Hallenlänge durchlaufende und bei den Stahlträgern jeweils gestoßene Träger IPE 400 angeordnet.

Bild 8b zeigt die Resultate der nach der Sanierung durchgeführten Hüpfversuche von 36 Schülern im Alter von 13 bis 15 Jahren. Die Beschleunigungsamplituden bei einem Drittel bzw. einem Viertel bzw. einem Fünftel der neuen Deckengrundfrequenz von ~ 8.9 Hz deuten noch auf leichte Resonanzerscheinungen hin. Hier stimmt somit die Grundfrequenz der Decke mit der Frequenz der 3. bzw. der 4. bzw. der 5. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Einwirkung überein. Das Dämpfungsmaß der sanierten Decke wurde zu 2,5% gemessen.

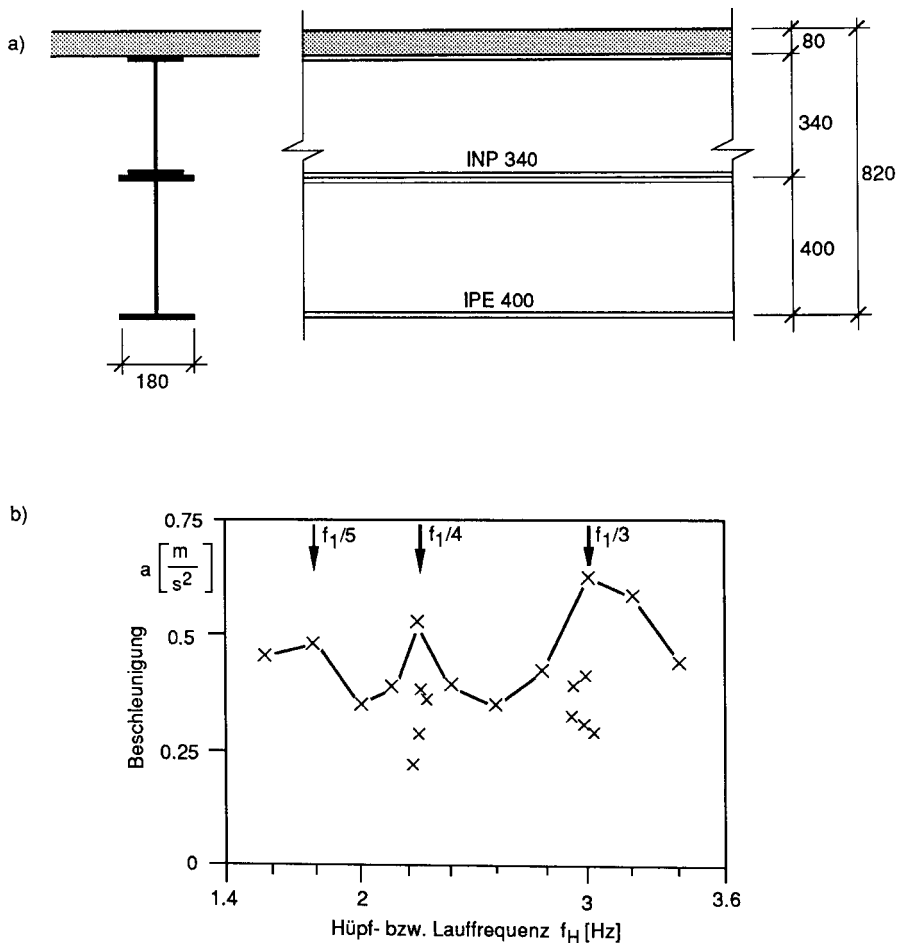


Bild 8:

Verbundträgerdecke nach der Sanierung.

a) Angeschweißter Stahlträger IPE 400; b) Resultate der Hüpfversuche.

Fußgängerbrücke mit horizontalen Schwingungen

Eine Fußgängerbrücke aus Stahlbeton mit Hohlkastenquerschnitt und einer Breite von rund 4 m ist als Durchlaufträger über sechs Felder mit einer Regelspannweite von 15,5 m ausgebildet (Bild 9). Die Brücke wird von rund 7 m hohen Einzelstützen mit einem Querschnitt von 65×30 cm getragen. Über diese Brücke strömten nach Schluß einer Großveranstaltung Fußgänger ausschließlich in einer Richtung. Dabei traten erhebliche Schwingungen in horizontaler Richtung auf, und zwar vor allem quer zur Gehrichtung, in geringerem Maß aber auch längs in Gehrichtung. Es kam zu einer panik-

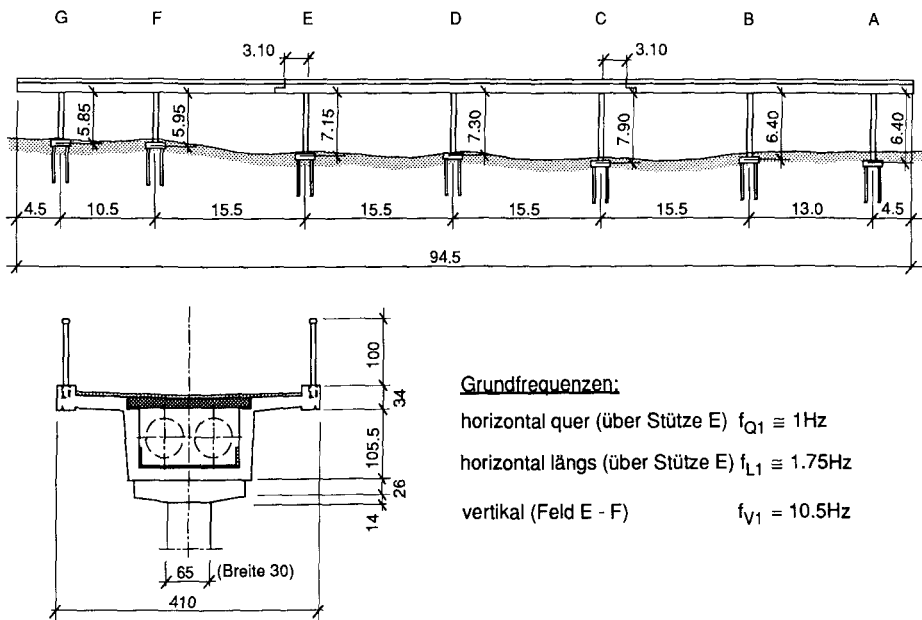


Bild 9:
Horizontal schwingende Fußgänger- und Radfahrerbrücke.

artigen Reaktion: Ein Teil der Personen kehrte um und wollte wieder zurück zum Brückenanfang, andere rannten in Gehrichtung davon, um sich am Brückende in Sicherheit zu bringen. Die Bewegungen der Brücke wurden mit denjenigen bei einem starken Erdbeben oder eines großen Schiffes bei hohem Wellengang verglichen.

Dynamische Versuche und Messungen ergaben die im Bild 9 angegebenen Grundfrequenzen. Betrachtet man das Fourier-Amplitudenspektrum der Kräfte, die der Mensch beim Gehen ausübt [1], so stellt man fest, daß solche horizontal quer zur Gehrichtung vor allem in der halben Schrittfrequenz abgegeben werden. Beim Gehen mit $\sim 2\text{ Hz}$ wirken somit periodische Kräfte mit $\sim 1\text{ Hz}$ auf die Unterlage ein. Im vorliegenden Fall trat Resonanz auf zwischen diesen Kräften und der Grundfrequenz der Brücke in Richtung quer zur Brückenaxe von $\sim 1\text{ Hz}$. Horizontal in Gehrichtung werden vor allem in der Gehfrequenz relativ große Kräfte abgegeben [1]. Dies erklärt die Schwingungen in Richtung der Brückenaxe.

Die Brücke mußte durch Anheben der Grundfrequenzen horizontal quer zur Brückenaxe und in Richtung Brückenaxe im Sinne einer Hochabstimmung saniert werden. Aus der Betrachtung der Fourier-Amplitudenspektren der durch den Menschen beim Gehen abgegebenen Kräfte [1] resultieren die folgenden Bedingungen:

$$f_{Q1} \geq 3.4\text{ Hz}$$

$$f_{L1} \geq 2.4\text{ Hz}$$

Das Anheben der Grundfrequenzen erfolgte durch Verstärken der Fundamente und Stützen. Die je vier Pfähle pro Fundament erwiesen sich als genügend tragfähig, hingegen mußten die Fundamentplatten verstärkt werden. Der Stützenquerschnitt wurde von 65×30 cm (Rechteckquerschnitt) auf $135 \times 75/30$ cm (Trapezquerschnitt) vergrößert. Die Oberfläche der bestehenden Stützen wurde zum Zwecke eines guten Verbundes mit dem neuen Beton sorgfältig aufgerauht, und im Erweiterungsquerschnitt wurden die neue Anschlußbewehrung des verstärkten Fundamentes und die neue kräftige Bewehrung der Stützen untergebracht. Die Erfolgskontrolle durch Versuche und Messungen der neuen Eigenfrequenzen soll demnächst noch durchgeführt werden.

Fußgängerbrücke mit vertikalen Schwingungen

Eine Fußgänger- und Radfahrerbrücke aus Stahl mit einer Breite von 2,5 m ist als Durchlaufträger über vier Felder mit den Spannweiten 16,00 m – 25,07 m – 20,09 m – 17,62 m ausgebildet. Bild 10 (links) zeigt den Querschnitt. Die beiden Längsträger bestehen aus einem geschweißten 300 m breiten und 690 mm hohen I-Profil. Auf den rund alle 2,50 m eingeschweißten Querträgern HEA 140 sind etwa quadratische und im Mittel rund 140 mm dicke Betonplatten über Neoprenelagern aufgelegt und verschraubt.

Die Brücke zeigte starke Schwingungen beim Gehen und beim Laufen, vor allem aber bei mutwilliger Anregung. Durch Hüpfen einer Einzelperson in der Mitte der Hauptspannweite konnten Beschleunigungen von 9 m/s^2 , d.h. 0,9 g (Erdbeschleunigung), erzeugt werden. Der rechnerische Wert, basierend auf den in [1] enthaltenen Grundlagen, ist $8,4 \text{ m/s}^2$. Die Grundfrequenz der Brücke ohne wesentliche Nutzlast wurde zu 2.46 Hz festgestellt. Dieser Wert liegt knapp oberhalb des bei Fußgängerbrücken zu vermeidenden Bereiches von 1.6 bis 2.4 Hz (vgl. Tabelle 3). Die Dämpfung war jedoch außerordentlich gering. Das in Ausschwingversuchen ermittelte äquivalente viskose Dämpfungsmaß betrug bei kleineren Schwingwegamplituden nur $\zeta \cong 0.0025$! Ein Vergleich mit der Materialdämpfung von Stahl von $\zeta \cong 0.001$ bis 0.002 zeigt, daß fast nur die Materialdämpfung des geschweißten Haupttragwerks sowie etwas Lagerdämpfung vorhanden waren, der Anteil der durch bzw. über die Neoprene-lager dissipierten Energie ist gering. In diesem besonderen Fall war somit wegen der außergewöhnlich geringen Dämpfung trotz einer Grundfrequenz von mehr als 2.4 Hz eine Schwingungssanierung unumgänglich.

Dieses Bauwerk wurde nicht wie in den vorangehend beschriebenen Fällen durch Anheben der Eigenfrequenzen, also durch Verstärken, sondern durch den Einbau zweier Schwingungstilger in der Mitte des 25 m-Feldes saniert. Bild 11 zeigt eine Prinzipskizze. Das Bauwerk, d.h. das Hauptsystem, wird als äquivalenter Einmassenschwinger mit den zugehörigen Feder- und Dämpfungskonstanten modelliert. Seine Masse entspricht der modalen Masse der zu beruhigenden Eigenform. Der Tilger als Zusatzsystem mit Masse, Feder- und Dämpfungskonstanten muß dem Hauptsystem genau angepaßt sein. Die Ausdrücke für die optimale Tilgerdämpfung enthalten als wichtigen Parameter das Verhältnis der Tilgermasse zur modalen Masse des Haupt-

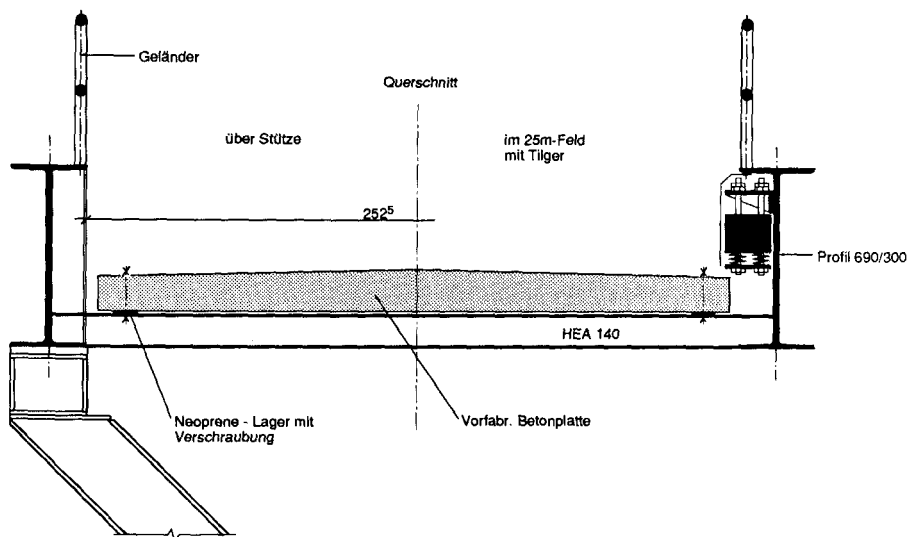
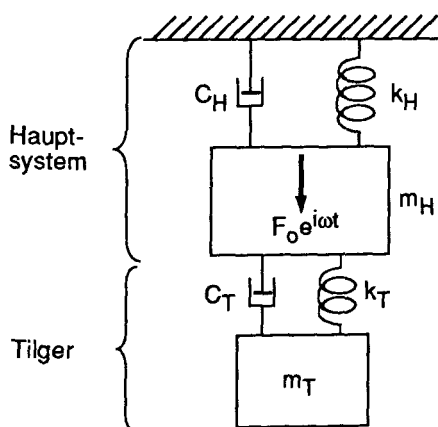


Bild 10:
Querschnitte der Fußgänger- und Radfahrerbrücke.



Optimale Tilgerfrequenz:

$$f_{T\text{opt}} = \frac{f_H}{1 + \underbrace{m_T / m_H}_{\text{Massenverhältnis}}}$$

Optimale Tilgerdämpfung:

$$\zeta_{T\text{opt}} = \sqrt{\frac{3(m_T / m_H)}{8(1 + m_T / m_H)^3}}$$

Bild 11:
Prinzipische Skizze Tilger und Formeln für optimale Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung.

systems (Bild 11). Im allgemeinen liegt dieses Verhältnis m_T/m_H bei $1/20$ bis $1/50$, abhängig von verschiedenen Einflußgrößen (vgl. [1]). Die Tilgerfrequenz beträgt demnach 0.95 bis 0.98 der zu beruhigenden Frequenz des Hauptsystems.

Im vorliegenden besonderen Fall mit der außergewöhnlich geringen Dämpfung des Hauptsystems konnte die Tilgermasse zu 2×350 kg, d.h. zu nur $1/87$ der modalen Masse des Hauptsystems gewählt werden. Die optimale Tilgerfrequenz betrug damit $f_T = 2.43$ Hz $\approx 0.99 f_H$ und die optimale Tilgerdämpfung $\zeta_T = 6,5\%$. Die beiden Tilger wurden möglichst schmal konzipiert, so daß sie von der Fahrbahnseite her in die Längsträger eingefügt und mit einer Blechhaube abgedeckt werden konnten (Bild 10 rechts). Dies erleichterte die Montage, und die gute Zugänglichkeit ist auch günstig bei allfälligen späteren Kontrollen und Unterhaltsarbeiten.

Bild 12 zeigt Ergebnisse von Versuchen zur Erfolgskontrolle. Durch Hüpfen einer Person ergab sich bei blockierten Tilgern eine maximale Beschleunigung von ~ 9 m/s². Bei frei schwingenden Tilgern konnte trotz eingehender Bemühung nur noch eine Beschleunigung von $\sim 0,5$ m/s² erzielt werden, also fast um den Faktor 20 weniger als bei blockierten Tilgern. Die Wirkung der Schwingungssanierung entsprach damit sehr gut den rechnerischen Voraussagen.

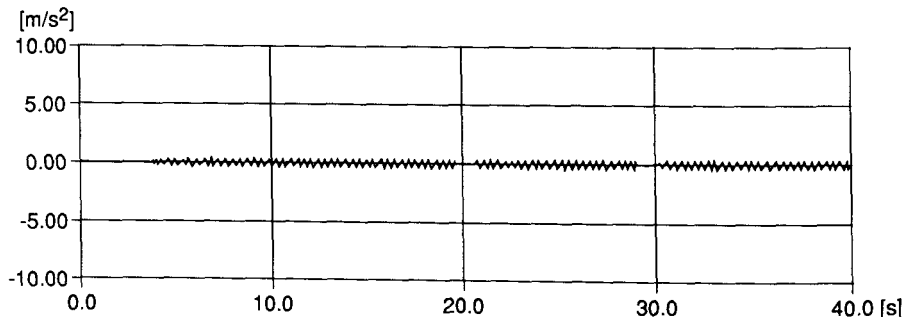
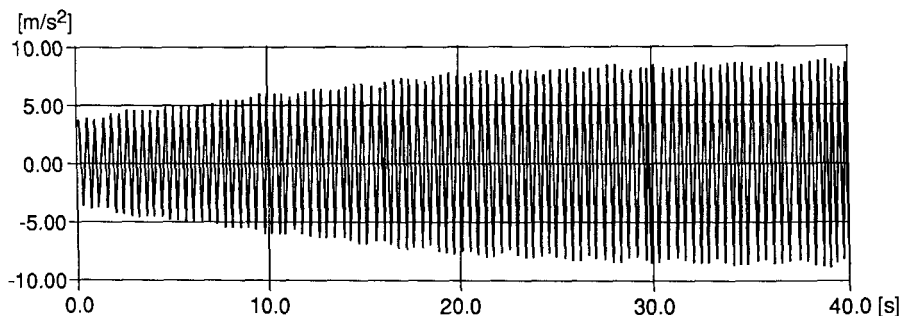


Bild 12:
Beschleunigungszeitverläufe der Brücke
infolge von Hüpfen einer Person bei blockierten und bei frei schwingenden Tilgern.

Sprungturm in Schwimmbad

Ein Sprungturm aus Stahlbeton hat Plattformen in 3 m und in 5 m Höhe, die von einem y-förmigen Stiel getragen werden (Bild 13). Die beiden Arme des Stieles sind auf der Höhe der unteren Plattform durch einen horizontalen Zugstab miteinander verbunden. Die untere Plattform ist mit einem Federbrett ausgerüstet. Der Stiel ist bis auf eine Höhe von 1,20 m unter dem Boden mit der Beckenwand monolithisch verbunden.

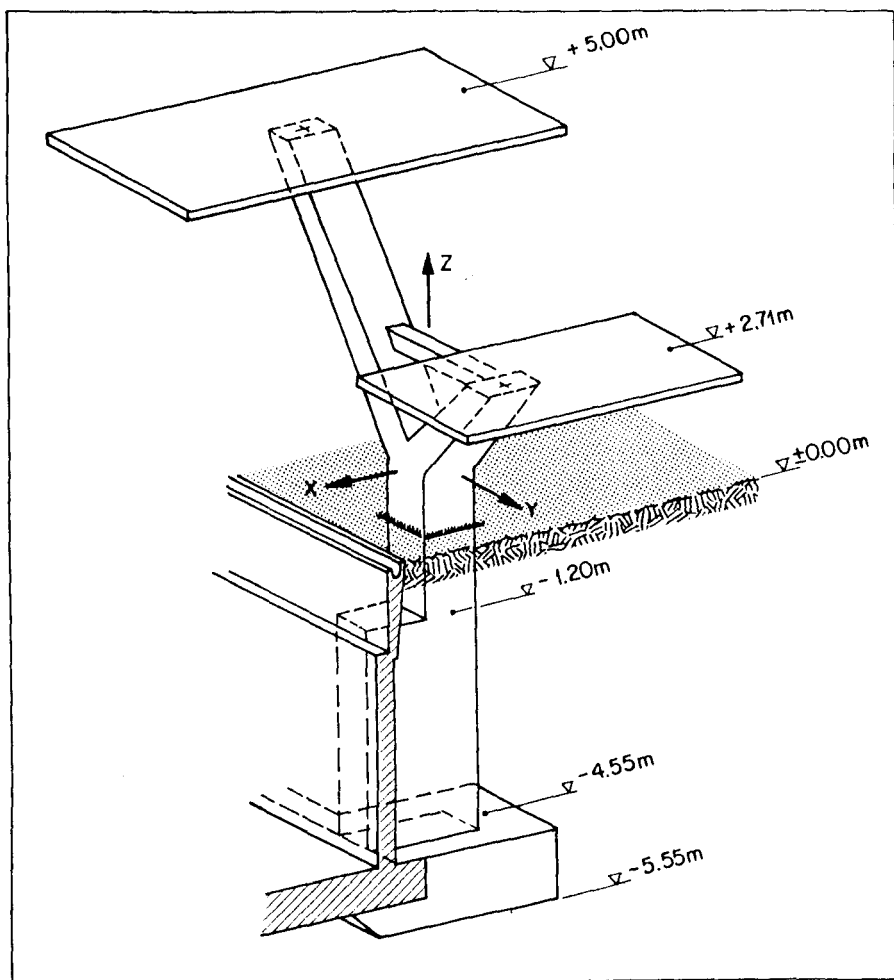


Bild 13:
Sprungturm im Schwimmbad.

Bei normalem Gebrauch durch Springer, die vor dem Absprung auf dem Federbrett hüpfen, zeigten sich störende Schwingungen. Ferner konnte der Sprungturm durch mutwillige Anregung, d.h. durch Hüpfen auf der oberen Plattform oder durch rhythmisches Rütteln (horizontales Ziehen und Stoßen) am dortigen Geländer, in starke Schwingungen versetzt werden, was vor allem durch jugendliche Badegäste mit Vorliebe praktiziert wurde.

Die Stiele zeigten einige Risse, die bei den Schwingungen sichtbar „arbeiteten“. Da Zweifel vor allem bezüglich Dauerhaftigkeit, Ermüdungsgefahr und Tragsicherheit des Bauwerks bestanden und auch die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt war, wurden durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) Versuche und Messungen vor allem zum Zwecke einer experimentellen Systemidentifikation durchgeführt. Dazu wurde das Bauwerk durch einen Hammer angeregt und die entstehenden Beschleunigungen an rund 50 Punkten gemessen. Damit wurden die folgenden Eigenformen identifiziert:

1. Eigenform:

Seitliche Schwingung in Richtung y-Axe, $f_1 \cong 2.8 \text{ Hz}$, $\zeta_1 \cong 1,6\%$

2. Eigenform:

Vor- und Rückwärtsschwingung in Richtung x-Axe, $f_2 \cong 4.2 \text{ Hz}$, $\zeta_2 \cong 1,2\%$

3. Eigenform:

Torsionsschwingung der oberen Plattform um die z-Axe, $f_3 \cong 4.9 \text{ Hz}$, $\zeta_3 \cong 0,9\%$

Höhere Eigenformen konnten als Kombinationen dieser drei Eigenformen identifiziert werden.

Zusätzliche Versuche wurden durch Testpersonen durchgeführt: Rhythmisches Hüpfen einer Person auf der oberen Plattform bewirkte dort eine Beschleunigung von $2,8 \text{ m/s}^2$. Durch Hüpfen mit Absprung vom Sprungbrett auf der unteren Plattform wurden an derselben in vertikaler Richtung eine Beschleunigung von $2,6 \text{ m/s}^2$ und in horizontaler Richtung eine solche von $4,6 \text{ m/s}^2$ erzeugt. Bei den Schwingungen erwies sich die 1. Eigenform als stark dominierend.

Eine Beurteilung zeigte, daß ein wesentlicher Teil der in [1] gemäß H. Mayer zur Gebrauchstauglichkeit von Sprungtürmen gegebenen Frequenzgrenzwerte und Steifigkeitskriterien nicht eingehalten war. Insbesondere sollten bei Vorhandensein eines Federbrettes die für die Stielschwingungen maßgebenden Eigenfrequenzen mindestens 5 Hz betragen. Während die Bedenken zur Dauerhaftigkeit durch Auspressen der Risse ausgeräumt werden konnten, wurden diejenigen bezüglich Ermüdungsgefahr und – in geringerem Maße – bezüglich Tragsicherheit bestätigt, so daß eine Schwingungssanierung erforderlich wurde.

Eine Verstärkung des Bauwerks zwecks Anheben der Eigenfrequenzen hätte ohne große Eingriffe in das Erscheinungsbild des Sprungturms und entsprechende Kosten nicht durchgeführt werden können. Als zweckmäßigste Maßnahme erwies sich die Entwicklung eines in horizontaler Richtung wirkenden Tilgers in der Mitte der oberen Plattform (Bild 14). Seine Aufgabe ist es, die schwingungsdominierende erste Eigenform bei 2.8 Hz entscheidend zu beruhigen.

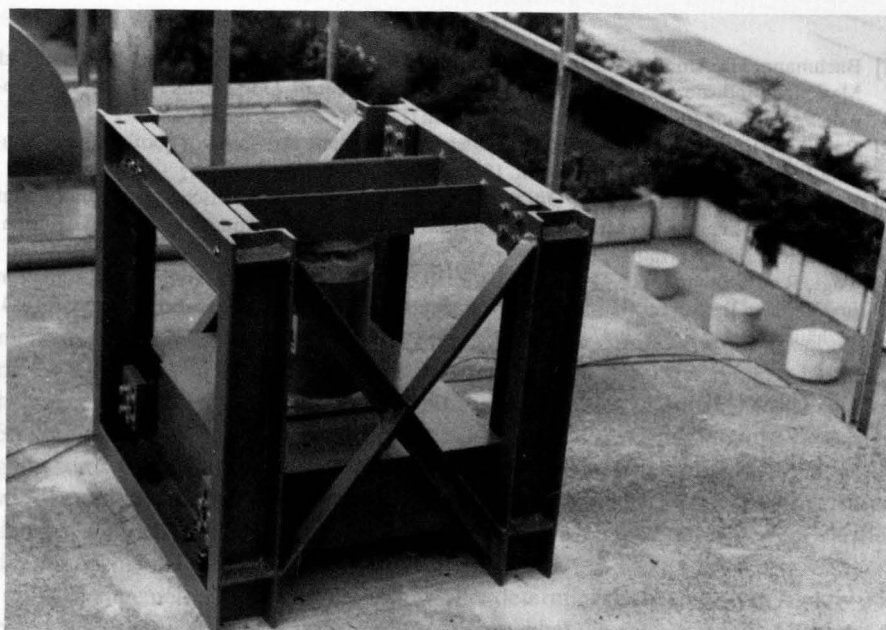


Bild 14:
Horizontaltilger auf der oberen Plattform des Sprungturms.

Die Masse des Horizontaltigers wurde zu 335 kg gewählt, was $1/36$ der modalen Masse des Sprungturms entspricht. Der Tilger wurde auf die optimale Frequenz von ~ 2.7 Hz gestimmt. Die optimale Tilgerdämpfung beträgt in diesem Fall $\zeta \approx 0.10$. Kontrollversuche mit Hüpfen auf der oberen Plattform und rhythmisches Rütteln am dortigen Geländer durch eine bzw. zwei Personen bewiesen die Wirksamkeit des Tilgers. Sämtliche größeren Beschleunigungsamplituden bei blockiertem Tilger wurden bei frei schwingendem Tilger um mindestens den Faktor 4 reduziert, und es traten keine Beschleunigungen größer als $0,6 \text{ m/s}^2$ mehr auf.

Folgerungen

Die wichtigsten Folgerungen aus zahlreichen praktischen Fällen der dynamischen Sanierung von Bauwerken mit menschenerregten Schwingungen sind:

1. Durch rhythmische menschliche Körperbewegungen können erhebliche dynamische Einwirkungen entstehen.
2. Bauwerke mit möglichen solchen Einwirkungen dürfen nicht nur auf statische Lasten bemessen werden.
3. Bei der dynamischen Bemessung sind mögliche Resonanzerscheinungen des Bauwerks mit oberen Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der Einwirkung zu beachten.

Literatur

- [1] Bachmann, H., Amman, W.: Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Structural Engineering Documents No. 3, Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH), Zürich, 1987.
- [2] Rainer, J.H., Pernica, G., Allen, E.: Dynamic Loading and Response of Footbridges. Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 15, pp. 66–71, 1988.
- [3] Baumann, K., Bachmann, H.: Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-3, Birkhäuser Verlag Basel, 1988.
- [4] Vogt, R., Bachmann, H.: Dynamische Lasten durch rhythmisches Klatschen, Fußstampfen und Wippen. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-4, Birkhäuser Verlag Basel, 1987.